

热泵蒸馏节能研究^{*}

王 维 德

(华侨大学化工与生化工程系, 泉州 362011)

摘要 对热泵蒸馏技术的概念、节能程度和应用情况等论述, 通过热力学分析对热泵蒸馏的节能原理进行研究.

关键词 热泵蒸馏, 节能, 热力学分析

分类号 TB 611

蒸馏是工业上应用最广泛的分离均相混合物的方法, 同时也是能耗最大的化工单元操作^[1]. 由于能源危机以及原油价格的不断上涨, 研究蒸馏节能技术具有重大意义. 纵观国内外蒸馏节能技术的进展及发展趋势, 可将其分为提高蒸馏塔能效、建立高能效的蒸馏复合分离系统和开发新的替代技术等三类^[2]. 提高蒸馏塔能效包括热泵技术、多效蒸馏技术, 以及为提高塔效率而实现节能目的的新型填料、新型塔板等的研究开发. 本文对热泵蒸馏的概念、节能程度和应用情况等论述, 并从热力学分析的角度出发对热泵蒸馏的节能原理进行研究.

1 热泵节能原理及热力学分析

1.1 热泵节能原理

热泵节能技术早在 1924 年就被 Kilven 所阐述. 其基本原理是: 利用某种工作介质吸收塔顶蒸汽的相变热, 通过热泵(其实质为压缩机) 对工作介质进行压缩, 使其升压升温, 然后作为再沸器的加热热源. 于是既省掉了常规蒸馏再沸器的加热蒸汽, 又省掉了常规蒸馏塔顶冷凝器的工业水冷凝换热, 从而实现了节能目的.

1.2 热泵蒸馏节能的热力学分析

在实际使用上有两种流程: 一种是塔顶蒸汽直接作为热泵的工作介质, 如图 1a 所示; 另一种是选用某种与塔顶蒸汽和再沸器间接换热的适宜物质作为工作介质, 如图 1b 所示.

1.2.1 塔顶蒸汽作工作介质

对于非理想溶液, 将其分离为各纯组分的最小功(理想功) 为

$$W_{id} = f \Delta H_m \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) + f R T_o \sum x_i \ln x_i; \quad (1)$$

若为理想溶液, 则为

$$W_{id} = R T_o \sum x_i \ln x_i. \quad (2)$$

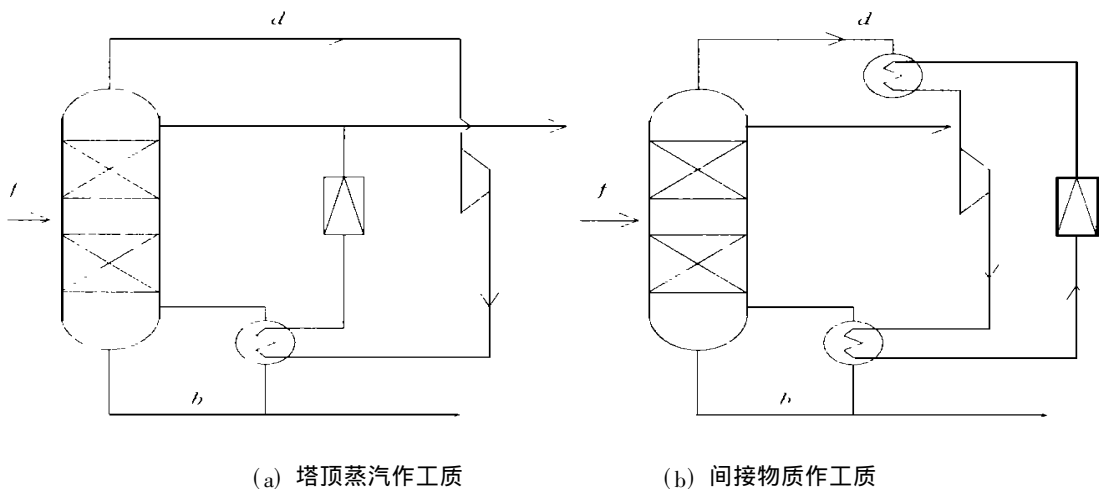


图 1 热泵蒸馏流程

实际分离过程由于存在种种不可逆因素, 消耗的能量大大超过理想功. 忽略热损失以及温度对物料焓值的影响(与相变热相比可以忽略), 则蒸馏过程的损耗功为

$$W_L = T_o[(dS_d + bS_b) - fS_f] + T_oQ_d\left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_b}\right), \quad (3)$$

其中 $Q_d = d(R+1)I_v$.

在式(3)中, 第一项的数值远比第二项小, 也可忽略, 则

$$W_L = T_oQ_d\left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_b}\right). \quad (4)$$

当采用常规蒸馏时, 其热效率 η_t 为

$$\eta_t = W_{id}/Q_b, \quad (5)$$

而其热力学效率 η_a 为

$$\eta_a = W_{id}/(W_{id} - W_L), \quad (6)$$

η_t 和 η_a 均远小于 1. 由式(3), (4)可知, 常规蒸馏减小回流比是降低加热蒸汽用量和减少损耗功, 从而实现节能的主要因素.

当用热泵进行蒸馏时, 热泵所提供的功 W_p 应等于损耗功与理想功绝对值之和, 即

$$W_p = W_L + |W_{id}| = W_L - W_{id}, \quad (7)$$

因 W_{id} 的绝对值远较 W_p 小, 所以

$$W_p \approx W_L = T_oQ_b\left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_b}\right). \quad (8)$$

上式中, Q_b 与 W_p 的比值称为供热系数 (COP), 它代表着热泵蒸馏的节能程度, 即

$$\text{COP} = \frac{Q_b}{W_p} = \frac{T_d T_b}{T_o(T_b - T_d)}. \quad (9)$$

由于热量的有效能比相同数值的功小, 一般而言, 当 COP 小于 3 时, 利用热泵实际上是达不到节能目的^[6]. 由式(9)可知, 蒸馏塔通常有保温层, 环境温变的影响应该很小, 降低环境温度和塔釜、塔顶温度差, 提高物系的操作温度, 则 COP 较大. 许多物系的 COP 大于 3. 例如, 常压条件下, 忽略塔板压降对沸点的影响, 苯-甲苯物系的 COP 达到 8.1. 对于 COP 大于 3 的

物系,利用热泵蒸馏技术实现节能具有实际应用意义.

1.2.2 间接物质作工作介质

这种流程可用于塔顶产物不便于直接压缩的情况,如腐蚀性强或毒性大的物料.利用塔顶产品冷凝器来汽化某种便于压缩的工作介质,则要求其具有较合适的热力学性质、无毒及腐蚀性小.其操作过程的热力学分析与直接蒸汽工作介质相似.由于间接工作介质在操作中循环使用,也可由其 $T-S$ 图进行热力学分析,如图2所示.

图2中,塔顶蒸汽在冷凝器中将温度为 T_1 的工作介质(状态点1)汽化后进入热泵压缩到 P_2 , 温度升为 T_2 (状态点2); 然后与再沸器换热,液化至状态点3或3' (过冷状态), 经节流膨胀至状态点4或4' (等焓过程), 再由塔顶蒸汽汽化至状态点1, 构成一个循环.

从 $T-S$ 图分析可知, 在一个循环中, 单位工作介质从塔顶蒸汽吸收的热量 q_d 为

$$q_d = H_1 - H_4, \quad (10)$$

而热泵对单位工作介质提供的功为

$$W'_p = H_2 - H_1. \quad (11)$$

热泵的经济性能用消耗单位功所得到的供热量来衡量, 称为制热系数(ω), 即

$$\omega = q_d / W'_p; \quad (12)$$

若为可逆热泵, ω 由下式计算

$$\omega = T_b / (T_b - T_d) \quad (13)$$

ω 越大, 节能意义越大.

3 热泵技术应用情况

热泵所需要的能量, 只是它可能提供的全部热量的一部分, 因此它具有显著的节能效果. 由于经济发展和能源供应矛盾日益突出, 热泵节能技术在世界范围内越来越受到关注. 80年代成立了国际热泵委员会以推动热泵技术的发展^[1]. 美国、日本和欧洲国家都在致力于热泵节能的研究开发, 并在工业生产得到广泛应用^[1]. 我国在热泵节能方面也开展了一定研究和应用, 取得了显著的经济效益. 例如, 96年初吉林化学工业公司动力厂对储运车间进行技术改造, 利用热泵装置回收 0.25 MPa 的低压蒸汽, 流量为 $1 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, 每年产生的经济效益约 50 万元^[6]. 然而, 不可否认, 我国这方面的研究开发工作还很落后, 工业应用实践则更少. 我国是个能耗大国, 能源利用率又低, 有大量的余热资源有待回收利用, 因而积极开展热泵节能研究和开发工作具有极大的现实意义.

热泵蒸馏在国外已广泛应用于工业生产^[6,5], 其装置主要由蒸馏塔、压缩机和热交换器组成, 系统看似简单, 其实相当复杂, 要注意各个单独装置严格优化和各个装置的理想配合, 才能取得最好的经济效益.

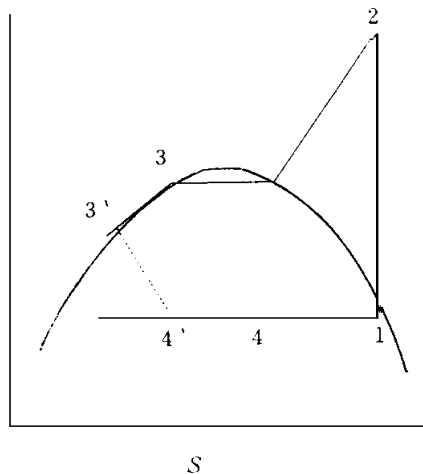


图2 间接工质热泵制热循环

如上所述, 热泵蒸馏分为塔顶蒸汽直接作为热泵作介工质和采用间接物质作工作介质两类, 两者各有优缺点. 前者的优点是不需冷冻剂, 系统装置较简单, 操作温度范围较广, 缺点是有些塔顶蒸汽不适宜作热泵作工作介质. 后者的优点是可大量节省操作费用和可使用标准热系统, 缺点是需两个热交换器, 压缩机需克服较高的温差和压差, 效率较低, 此外, 受工作介质化学稳定性的制约, 操作温度一般应在 130℃ 以下.

4 结束语

(1) 利用热泵蒸馏能做节约能耗, 一般当供热系数大于 3 时, 即有实际利用价值. 供热系数越大, 节能效果越显著. 我国是能耗大国, 能源利用率较低, 有大量低品位能量有待回收利用, 因而开展热泵蒸馏研究开发, 有着广阔的工业应用前景.

(2) 应注意热泵蒸馏系统各个装置的优化, 特别是选用高效的传热设备至关重要. 此外, 要注意系统各装置之间的理想配合, 才能取得最佳的经济效益.

(3) 热泵蒸馏有采用塔顶蒸汽和利用间接物质作工作介质两类, 两者各有优缺点, 具体采用哪种形式, 应依据具体的物系和经济核算而定.

参 考 文 献

- 1 余国琮. 蒸馏过程和设备的现状和展型. 化学工程, 1992, 20(2): 20~25
- 2 伍昭化, 陈永红, 刘乃鸣. 蒸馏节能技术进展. 化工装备技术, 1993, 14(4): 25~29
- 3 庞金钊. 蒸馏技术的节能研究. 天津轻工业学院学报, 1989, (2): 56~62
- 4 王锡生. 吸收式热泵在工业上的应用. 节能, 1997, (7): 10~15
- 5 朱自强, 徐 汛. 化工热力学. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社, 1991. 104~105
- 6 杨立臣. 新型节能设备——蒸汽喷射式热泵在我厂的应用. 节能, 1997, (5): 27~29

A Study of Energy Saving of Heat Pump Distillation

Wang Weide

(Dept. of Chem. & Biochem. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract With respect to heat pump distillation, an exposition is given to its concept, extent of energy saving and applications; and a thermodynamic analysis is made on the principle of energy saving.

Keywords heat pump distillation, energy saving, thermodynamic analysis